

As set forth above, transition of power from an incident beam to an output beam at a desired optical frequency can be most simply carried out in this embodiment by quasi-phasematching (QPM). While the quasi-phasematching is not new per se, the following description will aid in understanding its application in the present invention. It is believed that it will be helpful to firstly consider standard birefringent phasematching.

Generation of an optical second harmonic is possible in a medium having a nonzero second-order nonlinear polarizability. An incident fundamental generates a forced wave with the second harmonic which travels at the same velocity as the fundamental in the medium having this nonlinear polarizability. When the fundamental vector is  $k_1$ , the forced wave has a wave vector  $2k_1$ .

Boundary conditions obtained by the Maxwell equation require that a free second harmonic having a wave vector  $k_2$ , generated at the surface, also be present in the crystal. The second harmonic intensity in the crystal is determined by the result of interference between the above two waves. Because of dispersion in the medium, the free wave and the forced wave do not generally travel at the same velocity. They collide against each other, resulting in a second

harmonic intensity which varies sinusoidally with a distance in the crystal as power is alternately transferred from the fundamental to the second harmonic and from the second harmonic to the fundamental, at a half-wave period equal to a coherence length  $l_c$ . This state is shown by a curve C in Fig. 4(a). The coherence length  $l_c$  is given by  $l_c = p/\Delta k$ , where  $\Delta k = |2k_1 - k_2|$ . (In a waveguide, the wave vectors are replaced by mode propagation constants, but they are qualitatively identical.) The second harmonic intensity where  $z=L$  is given by the following formula:

$$I_2\omega[\omega^2 d^2 L^2 (\sin^2(\Delta k L/2)/(\Delta k L/2)^2)] \quad (A-1)$$

where  $d$  is the relevant effective nonlinear coefficient, which is proportional to the second-order nonlinear polarizability. It can be seen from the formula (A-1) that the peak intensity of the second harmonic becomes smaller as the wave vector mismatch  $\Delta k$  becomes larger. For this reason, a process referred to as phasematching is necessary so as to make  $\Delta k$  exactly zero. Under a phasematched condition, the second harmonic intensity increases monotonically with the square of the distance in the crystal, as shown by the curve A in Fig. 4(a). This condition can be obtained by appropriately polarizing the fundamental in birefringent crystals, thereby allowing it to propagate in a direction such that the orthogonally

polarized second harmonic has the same refractive index as the fundamental. This technique is referred to as angle matching or critical phasematching. Assuming that the crystal has the proper amount of birefringence which varies sufficiently with temperature, so-called non-critical phasematching can be implemented by adjusting a temperature at an angle of 90 degrees relative to the optical axis of the crystal.

Quasi-phasematching, as an alternative to the birefringent phasematching set forth above, is shown by the curves B in Figs. 4(a) and 4(b). When  $\Delta k \neq 0$ , the free and forced second harmonics accumulate a relative phase shift  $p$  for each coherence length  $l_c$ . When the phase of polarization of the forced wave shifts by  $p$  at a point where transition from the second harmonic power to the fundamental begins, the power continues to make the transition to the second harmonic. This can be implemented by reversing the sign of the nonlinear coefficient  $d$ , i.e. by instantaneously changing the crystal orientation. In the case of ferroelectric  $\text{LiNbO}_3$ , this reversal of the crystal optical axis can be carried out by changing the sign of the polarization  $P_s$  in the same crystal. Maximum efficiency can be obtained by changing the direction of the polarization  $P_s$  for each coherence

length.

⑫ 公表特許公報(A)

平4-507299

⑬ 公表 平成4年(1992)12月17日

⑭ Int. Cl. <sup>7</sup>	識別記号	庁内整理番号	審査請求	未請求	予備審査請求	有	部門(区分)	6(2)
G 02 F 1/35 1/37		7246-2K 7246-2K 7630-4M	H 01 S	3/094	S※			(全 8 頁)

⑮ 発明の名称 非線形光発振器と半導体の強誘電分極領域の制御方法

⑯ 特 願 平2-503699  
⑰ 出 願 平2(1990)1月31日

⑱ 翻訳文提出日 平3(1991)7月31日  
⑲ 国際出願 PCT/US90/00425  
⑳ 国際公開番号 WO90/09094  
㉑ 国際公開日 平2(1990)8月23日

優先権主張 ㉒ 1989年2月1日 ㉓ 米国(US) ㉔ 305,215

⑳ 発 明 者 バイアー ロバート エル アメリカ合衆国 カリフォルニア州 94305 スタンフォード ア  
ラーダイス ウエイ 891  
㉑ 出 願 人 ザ ボード オブ トラストイ アメリカ合衆国 カリフォルニア州 94305 スタンフォード  
ーズ オブ ザ リーランド (番地なし)  
スタンフォード ジュニア ユ  
ニバーシティ  
㉒ 代 理 人 弁理士 中 村 稔 外7名  
㉓ 指 定 国 AT(広域特許), BE(広域特許), CA, CH(広域特許), DE(広域特許), DK(広域特許), ES(広域特  
許), FR(広域特許), GB(広域特許), IT(広域特許), JP, KR, LU(広域特許), NL(広域特許), SE  
(広域特許)

最終頁に続く

請 求 の 範 囲

1. 希望光周波数を有する非線形電磁放射変換器で、  
基材となる固体と、  
前記希望光周波数とは異なった一つかまたはそれ以上の周波数を有する電磁放射のソース手段と、  
電磁放射を閉じこめるため前記固体により与えられる導波路手段と、  
前記ソース手段より前記導波路手段に電磁放射を向ける手段と、  
前記ソース手段よりの放射を前記希望光周波数を有する出力放射に変換するため、導波路で誘導される進行路を横切って主電気分極の異なった状態の強誘電領域を有する前記導波路手段を含む事の特徴とする前記非線形変換器。
2. 前記ソース電磁放射と出力電磁放射はコヒーレントで、前記ソース電磁放射と前記出力電磁放射の間で単位相整合を提供する為に選択された長さを持つ前記領域を特徴とする請求の範囲第1項に記載の非線形変換器。
3. 前記導波路は強誘電結晶に形成されている事の特徴とする請求の範囲第1項に記載の非線形変換器。
4. 前記導波路手段は前記固体の中にあるチャンネル導波路で固定されることを特徴とする請求の範囲第1項に記載の非線形変換器。
5. 前記領域の各々は非線形相互作用のコヒーレント長の奇数倍の長さに大体等しい特徴を有する請求の範囲第1項に記載の非線形変換器。
6. 主電気分極の異なった状態の前記領域の成りものは前記固体内に於て前記領域のその他のものとは組成が異なる特徴を有する請

求の範囲第5項に記載の非線形変換器。

7. 希望光周波数は前記ソース手段より与えられる放射の周波数の第二高調波に等しいことを特徴とする請求の範囲第1項に記載の非線形変換器。
8. 前記希望光周波数の前記放射が390ナノメートルから492ナノメートルの範囲にある波長である事を特徴とする請求の範囲第1項に記載の非線形変換器。
9. 光共振回路を形成する方法にて、  
基材となる固体内に光放射の進行路を固定するステップと、  
前記進行路上で光放射と相互作用の為、前記光共振回路内に異なった主電気分極を有する領域を形成するステップを含む事を特徴とする方法。
10. 少なくとも主電気分極の前記領域のあるものは、固体内の前記領域の成りものに於いて必要とする電気分極を形成するため電圧値を有する電場を前記固体の外部より前記領域の成りものに加える事によって形成される事を特徴とする請求の範囲第9項に記載の方法。
11. 前記電場は、電極を前記固体に接触させ、前記電極の内から選択されたあるものにたいして異なった値の電圧を加えることにより、前記領域にかけられ、前記電極の材料は、前記電圧が前記電極に加えられた時前記電極の材料が前記固体に拡散するのを阻止するため、固体の材料と加えられる電圧とに対応して選択される事を特徴とする請求の範囲第10項に記載の方法。
12. 前記電場が、電極を前記固体の異なった面に接触させ、前記異なった面の電極に対応して異なった電圧を加え、少なくとも前記面の一つは進行路からは十分に離す事によって、前記固体に拡散する前記電極の材料が前記進行路に干渉しないようにし

- ている事の特徴とする請求の範囲第10項に記載の方法かまたは請求の範囲第11項に記載の方法。
13. 異なった主電気分極の領域は、前記領域の隣接するそれぞれが隣とは異なった電圧を持つように、固体外部より、電場をかけて、それぞれ隣り合うように形成される事の特徴とする請求の範囲第10項に記載の方法。
  14. 前記光集積回路は和周波数または差周波数デバイスであり、前記進行路を画定するステップは前記ソースよりの電磁放射のあと希望周波数を有しかつ異なった主電気分極の前記領域を進行する電磁放射のあと単一進行路を画定するステップを含む事の特徴とする請求の範囲第9項に記載の方法。
  15. 前記光集積回路は第二高調波発生器であり、単一進行路を画定する前記ステップは前記固体中に放射の第一高調波と第二高調波の両方のあつた進行路を画定するステップを含む事の特徴とする請求の範囲第14項に記載の方法。
  16. 前記導波路は前記希望光周波数のコヒーレントな放射のあつた、異なった主電気分極の領域を形成するステップは希望非線形相互作用のコヒーレント長の奇数倍に大体に等しい長さそれぞれが有する領域を形成するステップを含む事の特徴とする請求の範囲第15項に記載の方法。
  17. 固体中に希望電気分極の領域を形成する方法で、前記希望主電気分極を形成するため、前記領域に於ける前記固体の組成を変更するステップを含む事の特徴とする方法。
  18. 前記固体の組成を変更する前記ステップは前記固体の隣接した領域では互いに異なって主電気分極を持つように前記固体の組成を変更するステップを含む事の特徴とする請求の範囲第17項に記載の方法。
- 導波路を形成する追加ステップを含む事の特徴とする請求の範囲第20項に記載の方法。
26. 前記固体の組成を変更する前記ステップは前記領域に於ける前記固体の化学的な組成の変更を含む事の特徴とする請求の範囲第17項に記載の方法。
  27. 固体内で希望電気分極の領域を形成する方法で前記領域の前記固体の組成を変更するステップと、前記変更された組成での希望電気分極を形成するために、前記領域が電圧値を有して、前記固体に電場が加えられるようにするステップを含む事の特徴とした方法。
  28. 固体内の希望電気分極を領域を形成する方法で、電極を前記固体に接触させ、前記電極の内から選択されたあるものになつて異なった値の電圧を加えることにより、前記領域にかけられ、前記電極の材料は、前記電圧が前記電極に加えられた時前記電極の材料が前記固体に拡散するのを阻止するため、固体の材料と加えられる電圧とに対応して選択される事の特徴とする前記方法。
  29. 前記固体はタンタル酸リチウムで前記極の一方に使用される電極はクロムであり、前記極の他方に使用される電極は金である事の特徴とする請求の範囲第28項に記載の方法。
  30. 前記領域での前記固体の組成を変更するステップを更に含む事の特徴とする請求の範囲第28項に記載の方法。
  31. 前記固体にて光放射の進行路を画定するステップと前記接触させるステップを含む、前記接触させるステップは更に、電極を前記固体の異なった面に接触させ、前記異なった面の電極に対応して異なった電圧を加え、少なくとも前記面の一つは進行路からは十分に離す事によって、前記固体に拡散する前記電極
19. 前記固体は同じ電気分極を有する前記隣接した領域をもち、前記固体の組成を変更するステップは、前記異なった電気分極を提供するため、前記領域の一つの組成を前記隣接した領域のそれに於ける固体の組成と異なるように変更するステップを含む事の特徴とする請求の範囲第18項に記載の方法。
  20. 前記変更のステップは、領域画定をするため、前記固体の表面にパターンを描くステップを含む事の特徴とする請求の範囲第17項に記載の方法。
  21. 前記パターンを描くステップは、電気分極が変化しないように領域を画定している前記表面の部分を除き、その後、前記固体とは異なった材料を、覆われていない前記固体の表面より、前記固体へ拡散させ、従つて、異なった組成を有する前記領域を覆われた領域と区別して画定するステップを含む事の特徴とする請求の範囲第20項に記載の方法。
  22. 前記固体はニオブ酸リチウムで、パターン材はチタンであり、前記材料を前記固体へ拡散させた後、前記隣接した領域を提供するため、得られた構造に熱処理を施す追加ステップを含む事の特徴とする請求の範囲第21項に記載の方法。
  23. 導波路を形成する前記ステップは前記熱処理の後に成される事の特徴とする請求の範囲第22項に記載の方法。
  24. 前記パターンを描くステップは、電気分極が変化しないように領域を画定している前記表面の部分を除き、その後、覆われていない前記固体の表面より、前記固体より拡散させ、従つて、異なった組成を有する前記領域を覆われた領域と区別して画定するステップを含む事の特徴とする請求の範囲第20項に記載の方法。
  25. 前記隣接した領域を進行する、希望周波数の電磁放射のあつた材料が前記進行路に干渉しないようにしている事を含んでいる事の特徴とする請求の範囲第28項に記載の方法。
  32. 固体にて希望電気分極を形成する方法で、電極を前記固体の異なった面に接触させ、前記異なった面にそれぞれ配置された電極に異なった電圧値を加える事を含む様な特徴を有する前記方法。
  33. 前記固体がタンタル酸リチウム結晶よりなる特徴を有する請求の範囲第32項に記載の方法。
  34. 前記固体にて前記領域を進行する光放射に進行路を画定するステップと、前記電圧が前記電極に加えられた時前記電極の材料が前記固体に拡散するのを阻止するため、前記固体の材料と加えられる電圧とに対応して前記電極の材料を選択するステップを含む事の特徴とする請求の範囲第32項に記載の方法。
  35. 前記領域に於ける前記固体の組成を変更するステップを含む事の特徴とする請求の範囲第32項に記載の方法。

## 明 細 書

## 非線形光変換器と半導体の強誘電分極領域の制御方法

アメリカ合衆国政府契約

本発明は合衆国海軍と合衆国空軍よりそれぞれ発注された契約 N0014-84-K-0327とAPOSR-88-0354のもとに、合衆国政府の支援により成されたものである。従って、合衆国政府は本発明にたいして特定の権限を有する。

## 発明の開示

## 発明の背景

本発明は電磁 (EM) 放射の高調波生成機能と他の和周波数や差周波数の変換機能の性能向上を図る為に導波路の電気分極の異なった状態の領域を利用した光変換器と固体内のかかる領域の制御に関する。

光放射変換器、即ち、一形態のエネルギーから EM 放射光へ変換する装置は以前より知られている。注目集めているのは非線形材料よりなるポンピング源としてのレーザーダイオードの組み合わせであり、それはダイオードより発する放射を希望周波数の光に変換する。非線形周波数変換の効率とそのパワーは厳密に制御する事が求められ、上記構成の動作バンド幅の広帯域化も求められている。

## 発明の概要

本発明は EM 放射を希望光周波数に効率良く変換する非線形変換器を提供する。

本発明はまた固体内で希望強誘電分極の向き (ポーリング) を形成、即ち、制御する。(ポーリングの意味は有極結晶や圧電結晶に於いて、領域域に強誘電分極の主方向を整える事である)。

広義には非線形変換器は、希望光周波数とは異なった一つまたはそれ以上の周波数を有する電磁放射源と、希望周波数を有する

電磁放射とその放射源の両方または何れか一方から電磁放射を封じ込めておく目的の導波路が、その中かまたはそれに接してあるような固体を含む。本発明を実施するためには、放射源よりの放射を、希望光周波数を有する放射に変換する為、導波路はその導波路により誘導される放射の進行方向を横切る方向に強誘電分極の異なった、二つかそれ以上の領域 (分極) を有する。(ここで用いられている、強誘電分極の状態と分極即ち、領域はそこに於いてはある強誘電分極の向きが他の強誘電分極の向きより優越な事を意味する。EM 放射や EM の性質を意味するのに用いられている "光" と言う用語は可視波長スペクトルとそれに隣合った他の波長スペクトルに含まれる電磁放射を規定、即ち含み、1 ナノメートルから 15,000 ナノメートルのレンジにある波長を有する放射を指す場合が一般的である。)

最も好ましくは各領域は放射源と放射との単位相整合 (QPM: quasi-phase-matching) を行っている進行路に於ける長さを持つる事である。単位相整合は状況では EM 放射を、希望光波長への非線形変換を相対的に効率良く達成する事が理解されている。例えば、単位相整合では、複屈折位相整合では利用できない、非線形係数の利用が可能となる。また他の状況では単位相整合を利用すると、希望周波数で動作可能となり、広帯域化が実現でき、更に複屈折では実行できない多数の材料で非線形変換が可能となる。

最も望ましくは、放射はコヒーレントな放射であり、非線形相互作用のコヒーレント長の寄与倍に大体等しい長さの進行路に沿って、領域はその長さ方向を有する事である。(コヒーレント長の意味するところは EM 放射源の場の位相と発生 EM が 180° の位相反転をする距離である。J. D. McHullin により Journal of Applied Physics, Volume 46, No. 7 (July 1975) に寄

せられた論文 "Optical Parametric Interactions in Isotropic Materials Using a Phase-corrected Stack of Nonlinear Dielectric Plates" はコヒーレント長の数学的定義とその取扱ひ方に関して述べている。) 上記のような構造は入射波より出力波へのパワーの移行を最適化する。

本発明による光変換器は最も好ましくは "青い" 光、即ち 390 から 492 ナノメートルの範囲にある波長を有し、そのレンジは色で言うと紫の可視光線を含む様な放射を発生させる事である。この波長のレンジの放射は多数の応用分野がある。

本発明はまた既に強誘電分極を有する固体内で、必要な強誘電分極の領域を形成する多様な方法を提供する。一つの方法は固体が異なった領域では異なった組成となるように固体の組成を変更する事である。これは固体にパターンを焼き、取選別された材料を除去する事によって簡単に実行できる。領域を形成するための分極の反転は固体に電場を加える事により実行できる。電気放電、即ち、固体の内部で材料が他の電極でなくある特定の電極に向かう行動、が良く生起する。固体の表面に電極を接触させて電場が固体に加えられた場合に特にそうである。電極が汚染物質として露出している、それに加えられた電圧はその遷移を引き起こす。汚染物質のこのような固体内への侵入は、固体が電磁放射と相互作用をする目的で設計されているこの場合、特に有害となり得る。本発明の実施例の一つでは電気放電は阻止されるかまたは、希望電気分極の領域を形成するため、固体の材料に対して電極とその電極に加える電圧を選択する事により利用している。他の実施例では固体内で電場を作るため使用される異なった電圧値を有する電極はそれに対応して固体の異なった表面に配置され、少なくともその表面の一つは固体内の EM 進行路からは十分に離れて前記表

面上の電極からの物質の EM 進行路への遷移を阻止して。

電気分極の領域を形成するため固体に電極を接続する方法に関しては幅広い概念が既に知られている。例えば、Proceedings of 1983 IEEE Ultrasonics Symposium に掲載されている Nakamura その他による "Poling of Ferroelectric Crystals by Using Interdigital Electrodes and its Application to Bulk-Wave Transducers" が参照できる。しかし、ここでの分極は機械的な振動の伝達を目的として設計された超音波トランスデューサーの為のもので、EM 放射と相互作用したり EM 放射を発生したりする目的の光変換回路の為のものではない。また、Applied Physics Letters (April 1975) Volume 26, No. 7 に掲載されている Levine その他による "Phase-Matched Second Harmonic Generation in a Liquid Filled Waveguide" を参照すると導波路内の液体は周期的に分極化した配置にでき、入射光の二次高調波をそこから生成可能であると記述されている。しかし、液体の分極は一時的であり (電場やその他の分極を形成するためのメカニズムが取り除かれると分極は消失してしまう)、ほとんどの応用分野で希望光周波数を提供する手段としては実用的ではない。また強誘電結晶導波路内で分極反転の考えが提案されたがこれはまだ実用化されていない。それぞれが主分極を有する薄い結晶板が積み重ねて分極反転を得た研究者もいる。これらの板は相互に適切な向きに配置されるように積み重なっている。IEEE Journal of Quantum Electronics, Volume QE-18, No. 6 (June 1982) に掲載された Rustagi その他による "Optical Frequency Conversion in Quasi-Phase-matched Stacks of Non-linear Crystals" にはこの一例が記載されている。この方法には製造上の決定的な問題がある。薄い板は非常に薄く (ミク

ロンのオーダー) その積み重ねの相対的な向きは変動し安い。動作可能な構造を実現するために必要な協合光学性を達成するのは困難である。ある研究者は周期的な層分極を実現するため分極の形成を制御しながら結晶を成長させる事を提案している。Applied Physics Letters, Volume 37, No. 7 (October 1, 1980) に掲載されたFengその他による "Enhancement of Second-Harmonic Generation in  $\text{LiNbO}_3$  Crystals with Periodic Laminar Ferroelectric Domains" が参照できる。この方法は幾いにくいミクロンオーダーの長さを有する強誘電領域の必要性故に実現可能性は低い。

本発明は多くの他の特徴と利点を有し、それらは次の好ましい実施例を例に取り説明され、明らかにしよう。

#### 図面の簡単な説明

第1図は本発明による非線形光発振器の好ましい実施例の等角全体図である。

第2図は本発明の特徴をせしめ、光発振器の図である。

第3図は本発明による化学分極処理の好ましい実施例を示すフローチャートである。

第4図(a)と第4図(b)は単位相整合の理解を容易にするための図である。

第5図は電気分極を示す図である。

第6図は本発明による電気分極の別の実施例を示す図である。

#### 詳細な説明

本発明による非線形光発振器を示している第1図と第2図を先ず初めに参照しながら説明する。発振器の全体は11で示され、必要な光周波数に交換される周波数を含むコヒーレントな入力電磁(E.M.)放射のソースを有する。ソースは一つかそれ以上の発

振、例えば、ガスレーザーかまたは固体レーザーでも良いが、本実施例ではレーザーダイオード12を使用している。その様なレーザーダイオードは同調が取られているかそうでなければ、変換用周波数を有するコヒーレントなE.M.放射を提供する従来の方法で制御されている。前記放射は固体14の中に形成されている導波路13に導かれる。その様な導波路は固体の一表面に、ここでは表面16、に形成されるのが最も望ましい。何故なら、導波路を形成する為の改造、例えば、固体の組成変更が、より容易であるし、従って、表面に於ける屈折率の変更もより容易である。固体14は強誘電体結晶であることが最も望ましく、導波路がチャンネル状に形成される。固体14は顕著な強誘電自然分極を特徴として持つようなニオブ酸リチウム( $\text{LiNbO}_3$ )、例えばPalo Alto, CaliforniaのCrystal Technology, Inc.より2カット $\text{LiNbO}_3$ 組み込みの光学基材として入手可能な強誘電分極単結晶でも良い。導波路13は上記結晶にプロトン交換で形成される。導波路はストリップ負荷タイプ導波路でも良いしまたリッジタイプ導波路でも良い。更に、もっと広い観点からは、導波路は例えばポスト拡散法によるように、結晶体の内部深く形成されても良いし、また例えばジュディシヤスコーティング法によるような結晶体の表面に形成されても良い。

レーザーダイオード12の出力は光ファイバー17により導波路のチャンネルの方へ誘導される。導波路へ出力が、導波路に沿って結合されるようにして、レーザーダイオードが固体の表面に直接接する方が望ましい幾つかの事例もある。この様な事例では出力を導波路に誘導する手段は光学軸を適切な向きに設定された接合部を提供する固定構造のみとなる。入力放射の偏光は非線形相互作用を最適化するように制御される。

本発明を実施する為には導波路による固定される放射光進行路を横切っての主要誘電分極の複数の異なる領域を導波路は含む。これらの領域は第1図では領域18で示されるが、第2図ではもっと分かりやすく示されている。

固体14はここでは14'となり、導波路13はここでは13'となっている。

レーザーダイオード12は12'となっており、その出力は導波路13'の入力端に対し最適になるようにレンズ19により焦点が合わせられる。導波路よりの出力放射はその応用目的に応じレンズ20により焦点が合わせられるようになっている。導波路13はチャンネル構造が望ましいが、広い観点からは、必ずしもその構造である必要はない。例えば、表面16に隣り合わせた平面型の構造でも良い。

矢印21は固体内の通常の分極の状態を示す。通常、固体14は前記矢印で示される方向に分極の主状態を持つ。広い観点からは、しかし、固体内に分極の主状態がある必要はない。しかし、固体14は初めより分極し、主電気分極が提供されているので、誘導した異なる主分極の領域は22で示される主分極の領域を成る事により簡単に形成可能である。即ち、22で示される領域の図は異なる分極の領域として動作する。本発明は固体自身が主電気分極を向かって有していない構造にも応用可能である。更に、誘導した領域が完全に逆向きの分極である必要もない。即ち、主分極を有する領域の長さとその配置を適当に選択する事によりパワーは必要周波数に交換される。しかし、導波路が出力される必要周波数からパワーを抽出する分極領域を含む場合はこの周波数に対するパワーを付加する逆向きの領域の数はパワーを取り除く領域の数より多くなければならないと言う事は重要である。

固体内の導波路に形成される領域の境界は破線であり、領域は第2図の22で示される。図示の如く、各領域は導波路の全深さ、また導波路の全幅を占有している(第1図参照)。この構造は各領域と放射の相互作用を最適化するのに有効であるので好ましいが、広い観点から観ると必要条件ではない。導波路の放射と異なる分極の領域の相互作用がある限り、領域は導波路に対して隣り合わせになっても良い。導波路に押し込められたE.M.放射光が形成された領域を横切る場合と請求の範囲にて記述されるときは上記の構造は実施され得る事を意味している。主強誘電分極領域が保持されるように固体はキュリー温度を越えない温度に保たれるべきである。(これは分極方向を保持するために、いかなる外力も加えられていないとの前提に基づいている)。領域反転が液体内の場合で、外力が液体に加えられていないときは得られた不連続な領域が明白に把握できる温度は存在しない。

領域22の各々は入射E.M.光と出力E.M.光の周波数間の単位相整合状態を形成できる長さになっている。最も好ましくは、入射E.M.光はコヒーレントで、前記長さは非線形相互作用のコヒーレント長の奇数倍に大体等しい。これは入射周波数により要求光周波数へのパワー変換を最適化する。分極領域と反転分極領域の長さは等しく第2図に示されているが、或状況では、異なる長さの領域を形成したり、非線形相互作用を最適化するため領域の周期性を変化させたりする事が有効な事もある。

本発明の最も簡単な形は、出力周波数が入力周波数の第二高調波となる周波数変換器として動作する固体の実施例である。以下に説明される単位相整合状態では、波長0.86ミクロンの入射光用の導波路を持つニオブ酸リチウム水晶は0.43ミクロンの出力光、即ち、既に述べた紫外レンジに属する光周波数を出力す

る。

広く論ずれば、この固体14は更に他の特徴を持ち得る。例えば、共振機能を増す為に、導波路中の放射の一つかそれ以上の周波数に共振する為の反射面を取り付けても良い。更に、上記固体自身がレーザー性の材料であり、出力を上げるためにレーザーを発しても良い。この様な構造では主分極領域はレーザーの共振器の内側でもよいし外側でも良い。またこの様な、構造では、領域を構成する材料はレーザー性のものである必要はない。本発明は粘土類を添加した強誘電性材料からなる固体を使用した場合にも応用できる。

ここで留意すべき点は第二高調波(SHG)は和周波数変換の特別な一例であると言う事である。SHGはE入射光の他の和周波数変換や差周波数変換とは数学的には別に取り扱わなければならない。本発明は単一入射光周波数よりSHGを得る例を特に扱っているが、必要光周波数を持つ出力光の生成するために二つ以上の周波数を持つE入射光を取り扱う場合にも応用可能である。

電気分極を達成する為の様々な方法がある。一方法は基材で異なった電気分極が必要な部位にその基材の組成に変更を加える事である。最も望ましくは、異なった電気分極の領域が互いに接するように配置する事である。もし、主電気分極がすでに形成されていれば、異なった電気分極を形成するために、或特定の領域にて、その他の領域の本来の固体の組成とは異なるようにするため、組成に変更を加えるだけでよい。例として、ニオブ酸リチウム結晶ウェーハの+C表面上にチタンを拡散させるとその拡散した部位には主電気分極の反転が起こる。この効果は既に基となる主電気分極を持つニオブ酸リチウム基材の表面に分極を起こ

れた。それは四つの異なるチタンの線のグレーティングを用いたパターンであり、各々が1 $\mu$ mの長さである。そのグレーティングの周期は15から22ミクロンである。各グレーティングラインは約4ミクロンの幅と5ナノメートルの厚みを持つ。この実験装置は1.06ミクロンの波長の放射を2倍の周波数にするように設定されており、グレーティング周期は分極領域が約3コヒーレント長になるように選ばれている。

熱処理は室温から1100℃になるまで2時間をかけ、その温度に30分さらしておいた。冷却は単に熱を供給していた炉の電源を切り、室温になるまで冷却するに任せた。これにより、初期冷却速度は8K/分となった。これら加熱、冷却工程は第3図、ボックス31と32に示される。

加熱、冷却工程での酸化リチウムの外方拡散の防止の為、チタンでコーティングした基材は一般溶融のニオブ酸リチウム粉末で満たし密封したアルミナのボートにセットされた。基材中にプロトン交換導波路がプロトン交換により、形成されている主電気分極の領域を横切って、作られた。これは200℃の安息香酸(高純度)に固体を浸し、350℃の融解液の下で熱処理する事で形成できる。これら工程は第3図のボックス33と34で示される。結果として得られた導波路は1.06ミクロンの単一TMモードの導波路である。

前述の如く、入射光より出力光への希望光周波数でのパワー移行はこの実施例にある準位相整合(QPM: quasi-phase-matching)により最も簡単に達成できる。準位相整合それ自身は目新しいものではないが、以下の説明は本発明に於けるその応用の理解に役立つ。先ず、準位相整合折位相整合につき考えることは有益と思える。

すのに利用されている。この表面にチタンでパターンを描き、その描かれたパターンは結晶材に拡散する。この工程と基材に導波路を形成する工程が第3図のフローチャートに図示されている。リフトオフリソグラフィーがチタン層のパターンを形成するために使用される。Hoechst Celanese A25214-Eの様な、適当なフォトレジストが、例えば、スピニングにより結晶の表面に塗布される。この塗布工程は第3図のボックス26で示される。フォトレジストで覆われた表面はボックス27で示されるようにマスク処理され、紫外線に露光される。露光済みのフォトレジスト材はボックス28で示される如く、マスクされてなかった表面より、例えばShipley Microposit現像剤を使用して除去される。次にチタン層が結晶露出面とフォトレジストを有する面と両方に塗布される。この塗布工程はボックス29で示される。

更に、チタンの下部に残存したフォトレジスト層は取り除かれて、チタンが基材に接着せず、剝離する部分が生じる。その結果、ニオブ酸リチウムの結晶体の+C面上にチタンによるパターンが描かれ、このパターンはこの結晶体の領域の組成を変更したい部位に一致した形になっている。

チタンは基材に拡散して行く。この工程では基材を900℃から1200℃の範囲の温度で熱し、この温度を或一定の時間保ち、次に室内温度まで冷却(熱処理)する。この拡散過程は領域の単純な組成の変化が発生したというのではなく固体の構造に化学変化が起きたと考えられている。即ち、固体の化学的な構造でニオブがチタンに替わったと考えられている。この事はしかし領域の材質の変化は相当する固体の部分の組成の変化を意味するが、固体全体の化学的な組成の変化を意味はしない。

一実施例ではニオブ酸リチウム基材は0.5mmの厚みで実行さ

光第二高調波の生成は非線形二次非線形分極率を有する媒質中で可能である。入射基本波はこの非線形分極率中で基本波と同じ速度で進行する第二高調波にて強制波を発生させる。k、を基本波波動ベクトルとすると強制波は波動ベクトル2k、となる。マスクウェルの方程式による境界条件は波動ベクトルk、の表面で生成した自由第二高調波は結晶の中でもまた存在する事を要求している。結晶中の第二高調波の強度は上記二つの波の干渉の結果で決定される。媒質中の分散により、自由波も強制波も一般的には同じ速度で進行はしない。これらは相互に衝突しあい、基本波から第二高調波へ、また第二高調波より基本波へと交互に、コヒーレント長L、に等しい半波長の周期で、パワーが移行しあう結果、結晶中を距離とともに正弦波的な変化をする第二高調波の強度がもたらさる。この状況は第4図(a)曲線Cで示される。ここでコヒーレント長L、は $L = \pi / \Delta k$ であり、 $\Delta k = |2k - k_2|$ 。(導波路では波動ベクトルはモード伝播定数に替わっているが、定性的には等価である)。Lに於ける第二高調波強度は下記の式にて与えられる。

$$I_{\omega} = I_{\omega}^2 L^2 (\sin^2(\Delta k L / 2) / (\Delta k L / 2)^2) \quad [A-1]$$

ここでdは今問題としている有効非線形係数であり、二次非線形分極率と比例関係にある。式[A-1]により、ピーク第二高調波強度は、波動ベクトルのミスマッチ $\Delta k$ が大きいくほど、小さい事が分かる。この理由で、位相整合と呼ばれる $\Delta k$ を正確にゼロにする工夫が必要とされる。位相整合状態では第4図(a)の曲線Cで示されるように第二高調波強度は結晶中を距離の二乗で単調に増加する。複屈折結晶で基本波を適度に偏光させ、直交方向に偏光した第二高調波が基本波と同一の屈折率に於かれるような方向に伝搬させるとき、上記状況は達成できる。この手法は角

特表平4-507299 (6)

度整合、または臨界位相整合と呼ばれている。仮に、結晶が温度変化に対し十分に変化する適量な屈折率特性を持つとすると、いわゆる非臨界位相整合が結晶の光学軸に対し90°の角度で温度調節により達成できる。

以上述べてきた複屈折位相整合に替わるものとして、単位相整合が第4図(a)と第4図(b)の曲線Bで示される。もし $\Delta k \neq 0$ なら、自由第二高調波と強制第二高調波はコヒーレント長 $l_c$ ごとに相対位相シフト $\pi$ を蓄積する。強制波の偏光の位相が第二高調波パワーが基本波に移行し始めた時点で $\pi$ だけ変化するとパワーは継続して第二高調波へ移行する。これは非線形係数 $d$ の符号を反転させる事により、即ち、結晶の向きを瞬時にして変更する事により達成できる。強誘電体  $\text{LiNbO}_3$  では結晶光学軸の反転は同結晶内の分極  $P_s$  の符号を変えて達成できる。最大効率は  $P_s$  の向きをコヒーレント長ごとに反えれば得られる。

第一次単位相整合と命名したこの状況は第4図(a)の曲線B1で示される。この図により、単位相整合での第二高調波パワーはまだ距離の二乗に比例して増加しているが、 $2d/\pi m$ で与えられる、もっと小さい有効非線形係数でもっての増加である。ここで、 $d$ は通常の非線形係数であり、 $m$ は周期分極グレーティングの領域長 $l$ が $l = m\lambda$ となるような値である。第二高調波の連続増加は奇数の $m$ に対してのみ得られる。第4図(b)の曲線3で示されている第三次の単位相整合は第一次位相整合と比較し、平均するとその $1/9$ の速さで増加していて、その第一次位相整合は完全位相整合と比較すると、 $(2/\pi)^2 = 0.4$ 倍の速さで増加している。この様な見かけ上の低い効率にもかかわらず、単位相整合を使用する理由は少なくとも以下の四つがある。単位相整合を使用しようとする理由は(1)角度調節や温度調節によ

- る複屈折位相整合で波長、幾何学的配置、や材質の制御が不可能、
- (2) 室温のような好まれる温度で相互位相整合を達成したい、
- (3) 複屈折的に位相整合されない非線形係数、例えば、両極に偏光した基本波と高調波とを結合させるような係数を使用したい、
- (4) バンド幅を増加させたい。

ニオブ酸リチウムは三つの異なる非線形係数を持つ。どの係数を第二高調波発生(SHG)に使用するかに付いては次の表が役立つ。

[表]

$\text{LiNbO}_3$  の非線形係数

$l_c$  (単位  $\mu\text{m}$ 、温度  $T = 25^\circ\text{C}$ )

係数	相対強度	$\lambda = 1.32 \mu\text{m}$	$\lambda = 1.06 \mu\text{m}$	$\lambda = 0.88 \mu\text{m}$
$d_{33}(d_{31})$	1.0	14.5	~130	4.3
$d_{22}$	0.7	6.4	3.4	1.7
$d_{24}$	0.5	5.5	2.9	1.4

最も一般的に用いられる係数は $d_{33}$ で約 $1 \mu\text{m}$ の波長にたいして複屈折位相整合できる。 $1.06 \mu\text{m}$ のSHGを発生させてみれば長いコヒーレント長よりこの事はみられる。この係数は他の二つの係数より位相整合されるのに近いので、他の波長でもコヒーレント長が長くなり、必要なスペースの周期的領域の形成を $d_{33}$ 単位相整合に近くしている。

$d_{22}$ は最も大きい係数であり、高い変換効率を得ようと思えば利用されるのが望ましい。これは同じ分極で波を結合しているので、単位相整合されねばならない。第一次単位相整合に関し、変換効率で複屈折位相整合された $d_{33}$ より20%高い。(従って、効率は $1/m^2$ となり、第三次位相整合の結果2.2%の利得が得られる)。

係数 $d_{22}$ は最も小さく、SHGの為のコヒーレント長は最も短くなる。これにもかわらず、 $m$ に分極した $\text{LiNbO}_3$ で放射の伝搬は光誘導の屈折効果による影響を受けないのでこの係数は使用されるであろう。

上記の如く形成された導波路で相互に反転した領域を持つニオブ酸リチウム結晶で単位相整合を使用する一実験で、導波路に対しての入力と出力はルチルプリズムを用いて成された。入力側では800nmの焦点距離を有する円柱レンズを通してビームが導波路に焦点を結ぶようにした。導波路の出力側で測定すると $1.06 \mu\text{m}$ で1mWの連続波パワーに対し、532nmでは0.5mWの出力光が得られた。基本波と高調波は $d_{22}$ を使用して適当な分極された。この装置の変換効率はW-cm当たり約5%である。

導波路は一ステップ当たり0.003%の屈折率で増加するステップ型の導波路にした。導波路の深さは4-7 $\mu\text{m}$ と考えられ、変換効率はW-cm<sup>2</sup>当たり7から10%と計算結果は示した。(これは先に得られた実測値と大体合っている)。これらの値より計算してみると、観測された第二高調波のパワーは相互作用がもし単位相整合でなかった場合に観測されるだろう値と比較すると大まかに1500倍も大きい値である。

固体として用いられる材質はニオブ酸リチウム結晶以外でも良く、拡散される材料も別のものでも良い。例えば、組成を改めるためにニオブ酸リチウムに拡散される他の材料はクロムとイットリウムを含む。

既に述べたように、或特定の領域の分極を制御するため、固体に電場をかける事により希望領域が分極する。第5図と第6図は導波路を横切ってその様な領域を形成するため電極が固体に接続される二つの方法を示している。これらの図で固体は14°で示

され、導波路は13°で示される。非線形固体内で相互作用するように入射光を誘導するやり方に対して、ある状況で光を自由に伝搬させる為、導波路が省略される。

第5図では電極のパターンは固体の表面に、導波路の隣接して、置かれ従って、希望領域間のスペースと長さに一致している。その様な領域の形成には電極を有する固体がそのキュリー温度以上に加熱される。この固体がキュリー温度より低い温度に冷却される過程で、電極がその交互の配列でより高い電圧とより低い電圧をくりかえして電極に電場がかけられる。電極はその後取り除かれる。希望領域はこの様に形成され、そのパターンは電極のパターンと一致する。この領域はその主分極を固体がキュリー温度近くに熱せられない限り保持し続ける。本発明を実施する為には、電圧が電極に加えらる時電極が固体に拡散しないように、電極の材質は固体の材質とそれに加えらる電圧に対応して選別されねばならない。汚染物質の導波路に対する遷移はこれで阻止される。

相対的な低キュリー温度を考慮すれば固体材質としてはタンタル酸リチウムが選ばれる。この固体で、正電圧が加えられる電極は金メッキしたクロム、従って、もう一方の電圧が加えられる電極は金である。第5図の21°の矢印で示される如く分極が制御された固体はもはや初めの分極を状態を保ってはいない。この事は領域22の各々に隣り合わせた導波路の領域は選択された主分極を持たない事を意味する。

第6図は導波路に対する汚染拡散を防止するもう一つの方法を示す。この方法で領域のパターンとなる金電極は単一の電圧の為のみで、他の電圧、例えばより負の電圧は導波路よりスペースを置いた別の異なる面に置かれる。そのスペース故に、その別の

面上に有る電極から導線路に対する汚染は最小に抑えられる。

ここで留意されるべき事は第5図と第6図に示される両方法は同時に実施出来るという事である。即ち、遷移を阻止するために固体の別の面に電極を置く事に加えて、電極の材質を遷移が起生しないように注意深く選別する。

両方法の変形もある。例えば、固体のキャリー温度より低い温度で、電場をかけ、分極処理の間、固体をその温度に保つ。周期的な電場は温度変化の傾斜を作り出す事により固体表面に熱電氣的に、例えば結晶表面で二つのレーザーを干渉させて、生成できる。更に、化学的な分極処理と電氣的な分極処理を同時に実行できる。即ち、それ自身だけでは希望分極を生成しない機材の組成を変更し、希望領域の分極を完成させるために、適当な電場を加える。本発明は特許法に従って、好ましい実施例とその変形に関して述べた。例えば、上記の固体の化学的電氣的な分極処理は上記の光発電器はもとより、光パラメトリック増幅器、光パラメトリック増幅器など多くの光集積回路に応用できる。本発明の範囲は請求の範囲とその均等範囲のみで定義される。

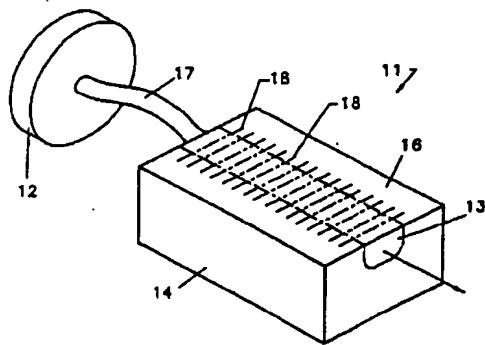


Fig. 1

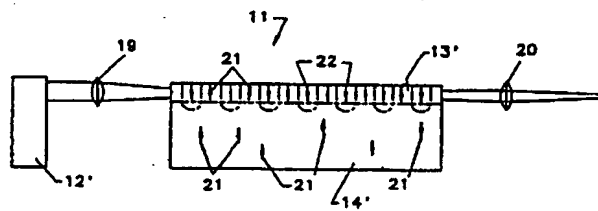


Fig. 2

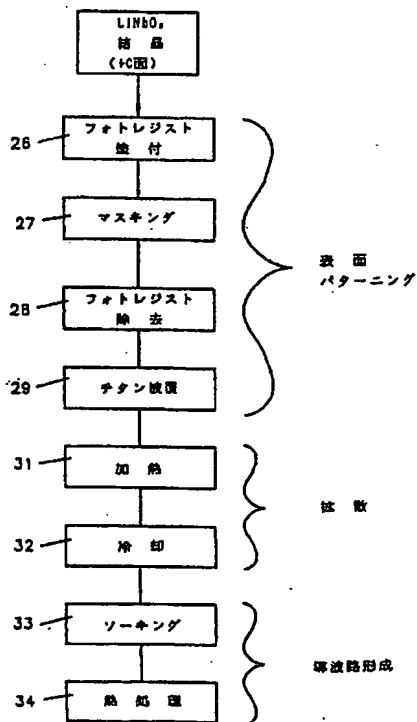


Fig. 3

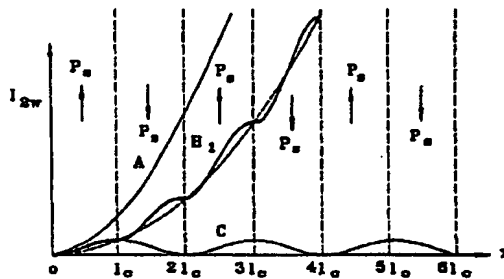


Fig. 4 (a)

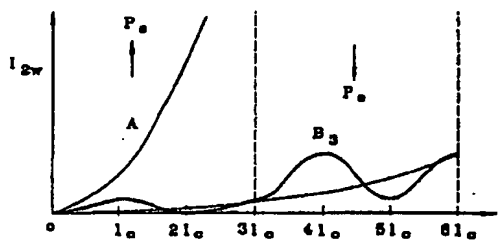


Fig. 4 (b)



【公報種別】特許法第17条第1項及び特許法第17条の2の規定による補正の掲載

【部門区分】第6部門第2区分

【発行日】平成9年(1997)10月14日

【公表番号】特表平4-507299

【公表日】平成4年(1992)12月17日

【年通号数】

【出願番号】特願平2-503699

【国際特許分類第6版】

G02F 1/37

H01S 3/094

3/109

【FI】

G02F 1/37 7625-2K

H01S 3/109 7809-2K

3/094 S 7809-2K

手 続 補 正 書

9.1.20

平成 年 月 日

特許庁長官 梶 井 英 光 殿

1. 事件の表示 平成2年特許願第513699号

2. 補正をする者

事件との関係 出 願 人

名 称 ザ・ボード・オブ・トラステーズ・オブ・ザ・リーランド  
スタンフォード・ジュニア・ユニバーシティ

3. 代 理 人

住 所 東京都千代田区丸の内3丁目1番1号

電話(代) 3211-8741

氏 名 (印) 井 上 中 村 隆



4. 補正命令の日付 自 発

5. (本補正により請求の範囲に記載された請求項の数は合計 23 となりました。)

6. 補正の対象 請求の範囲の欄

7. 補正の内容 別紙記載の通り

請求の範囲

1. 所望の光周波数を有する非線形電磁放射装置において、  
 固体誘電材料の本体と、  
 前記所望の光周波数とは異なった、1以上の周波数を有する電磁放射源と、  
 前記放射源からの電磁放射を前記本体に指向する手段とを備え、  
 前記本体は、前記放射源よりの放射を前記所望の光周波数を有する出力放射に変換するための、前記放射源から放射源を被って続く領域において自然分極の異なる状態を与えるそれぞれ異なる組成の複数の続く領域を有することを特徴とする非線形変換器。
2. 前記放射源の電磁放射と出力電磁放射はコヒーレントで、前記領域は前記放射源の電磁放射と前記出力電磁放射の間で相位相整合を与えるために選択された長さをも有することを特徴とする請求の範囲第1項に記載の非線形変換器。
3. 前記領域の各々は、非線形の相互作用のコヒーレント長の奇数倍の長さにはば等しいことを特徴とする請求の範囲第1項に記載の非線形変換器。
4. 前記固体誘電材料の本体は、ニオブ酸リチウムであることを特徴とする請求の範囲第1項に記載の非線形変換器。
5. 前記異なる組成の複数の続く領域は、ニオブ酸リチウムの領域によって分離されたニオブ酸リチウムとタンタルの領域によって与えられることを特徴とする請求の範囲第1項に記載の非線形変換器。
6. 電磁放射を制御するために、前記本体内部には本体上に形成された導波路手段を更に有することを特徴とする請求の範囲第1項に記載の非線形変換器。
7. 前記導波路手段は、その表面にある前記本体内に固定された導波路であることを特徴とする請求の範囲第1項に記載の非線形変換器。
8. 一体化された光学デバイスで選択された周波数の光放射を生成する方法において、  
 光誘電体の固体材料の本体内に放射源を決定するステップと、  
 前記放射源上で放射との相互作用のための前記放射源に沿って異なる自然分極分極の相の領域を形成するために、前記放射源における前記本体の異なる領域の組成を変更するステップであって、前記変更するステップは、前記異なる放射源

分極を与えるために、前記放射線における他の領域に前記本体の構成と異なる1つの領域にある組成を変更するステップを含む、且つ

その後、前記材料によって、前記選択された周波数を有する光放射に変換される前記放射線によって放射を通過するステップ、  
を有することを特徴とする方法。

9. 前記変更するステップは、それらの放射電分極を変更しないように前記表面を固定する領域の面積をカバーするステップと、

その後、異なる組成を有する前記領域を固定するために、カバーされない前記固体本体の前記表面の面積から前記本体材料の外へ放射するステップ、  
を有することを特徴とする請求の範囲第8項に記載の方法。

10. 前記変更するステップは、それらの放射電分極を変更しないように前記表面を固定する領域の面積をカバーするステップと、

その後、カバーされない前記固体本体の前記表面の面積から前記本体へ、カバーされる領域以外の、異なる組成を有する前記領域を固定するために、前記本体と異なる材料を放射するステップを有することを特徴とする請求の範囲第8項に記載の方法。

11. 前記材料を前記本体に放射するステップは、調整領域を与えるために多層の構造を更に熱処理するステップを有することを特徴とする請求の範囲第8項に記載の方法。

12. 前記変更するステップは、固体材料の前記本体を約900〜1200℃の範囲の温度に加熱するステップと、前記温度を特定の時間維持するステップと、その後、固体材料の前記本体を室温まで冷却するステップを有することを特徴とする請求の範囲第8項に記載の方法。

13. 前記本体は、ニオブ酸リチウムであり、前記変更するステップは、チタンを他の領域に放射するステップと、更に、前記物品および冷却中、混合したニオブ酸リチウムのバリエーションで満たされた閉じた容器に前記本体を維持するステップを含むことを特徴とする請求の範囲第8項に記載の方法。

14. 前記変更するステップは、前記他の領域の一つにある前記本体の化学的組成を変更するステップを有することを特徴とする請求の範囲第8項に記載の方法。

15. 前記異なる領域を楔切って、電磁放射のための導波路を形成する追加のステップを有することを特徴とする請求の範囲第8項或いは請求項13に記載の方法。

16. 放射材料の固体本体内の選択された放射電分極の領域を形成する方法であって、

電極を有する前記本体の異なる表面を接触するステップと、  
前記異なる表面にそれぞれ位置した電極に異なる電位値を印加するステップ、  
を有することを特徴とする方法。

17. 前記固体本体の材料に関する電極と電位が前記電極に印加されたとき、前記電極から前記本体へ材料の拡散を阻止するために電極に印加される電位を選択するステップを更に有することを特徴とする請求の範囲第16に記載の方法。

18. 前記本体は、結晶タンタル酸リチウムであることを特徴とする請求の範囲第16に記載の方法。

19. 前記電位値の1つに対して選択された電極は金でカバーされたクロムであり、前記電位値の値に対して選択された電極は金であることを特徴とする請求の範囲第16に記載の方法。

20. 電磁放射の周波数変換のための固体本体内に異なる主放射電分極の領域を有する光学デバイスを形成する方法において、

前記領域の1つにおける前記本体の組成を前記領域の他にある前記本体の組成と異なるように変更するステップと、

前記変更された組成における所望の主放射電分極を形成するために選択された電位値を有する本体に、電界を印加するステップ、  
を有する方法。

21. 前記領域は、和波、差波の周波数デバイスである光学デバイスの一部であることを特徴とする請求の範囲第20に記載の方法。

22. 前記光学デバイスは、第二高調波発生器であることを特徴とする請求の範囲第20に記載の方法。

23. 前記異なる主放射電分極の領域を有する光学デバイスを形成する方法は、意図された非線形の相互作用のフーリエ長の同数値とほぼ等しいそれぞれの長

さを有する異なる主放射電分極の領域を形成するステップを有することを特徴とする請求の範囲第20項に記載の方法。